

Approved For Release STAT
2009/08/19 :
CIA-RDP88-00904R000100120

Dec

Approved For Release
2009/08/19 :
CIA-RDP88-00904R000100120



Вторая Международная конференция
Организации Объединенных Наций
по применению атомной энергии
в мирных целях

A/CONF/15/P/2196/
USSR
ORIGINAL: RUSSIAN

Чт. подлежит оглашению до официального сообщения на Конференции

ТЕПЛО ВЫДЕЛЯЮЩИЕ ЭЛЕМЕНТЫ ДЛЯ
ВОДОВОДНЫХ РЕАКТОРОВ АТОМНЫХ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ

Амбарцумян Р.С., Глухов А.М.,
Гончаров В.В., Ковалев А.И.,
Скворцов С.А.

Среди мощных атомных электростанций, строящихся в Советском Союзе имеются станции, на которых устанавливаются водоводные реакторы.

Настоящее сообщение затрагивает основные вопросы разработки тепловыделяющих элементов для реакторов такого типа, и результаты испытаний, позволивших выбрать оптимальную конструкцию и технологию изготовления тепловыделяющих элементов.

Окончательная проверка выбранной конструкции может быть сделана лишь в процессе эксплуатации электростанций. Будет также накоплен опыт массового производства тепловыделяющих элементов и их переработки.

Устройство водоводного реактора для энергетических станций Советского Союза, подробно было описано в докладе на II-м секционном Заседании Всемирной Энергетической конференции в Белграде в 1957г.^{х)}

Активная зона реактора Ø3м и высотой 2,5 м размещена в прочном стальном корпусе. Тепловыделяющие элементы представляют собой длинные стержни Ø 10,2 мм, сердечники которых выполнены из двуокиси урана и снабжены оболочками из легированного циркония. Они собираются по треугольной решетке с шагом 14,3мм; дистанционирование осуществляется при помощи концевых и промежуточных решеток.

х) Краткое содержание этого доклада в иностранной литературе приведено, напр., в журнале *Nucleonics*, Vol 15, №7, July, 1957, стр. 21-22.

25 YEAR RE-REVIEW

-2-

Тепловыделяющие элементы объединяются в 343 шестигранные кассеты /по 91 элементу в каждой кассете/, которые устанавливаются одна около другой с шагом 147мм, заполняя весь объем активной зоны /рис.1-3/. Стенки кассет толщиной 2мм выполняются из сплава циркония.

Стержневой тип тепловыделяющего элемента был выбран из-за простоты формы и конструкции, обеспечивающей относительно низкую стоимость изготовления и возможность быстрого освоения массового производства.

При соответствующем выборе диаметра стержневые элементы позволяют в достаточной мере развить поверхность охлаждения на единицу объема элемента.

В реактор загружается топливо 1,5%-ного обогащения. При этом в целях достижения глубокого выгорания частичные перегрузки топлива будут производиться три раза в течение кампании. Таким образом в реакторе всегда будет присутствовать топливо разной степени выгорания. Чтобы имитировать это в начальный момент, некоторая часть тепловыделяющих элементов первоначальной загрузки выполняется из двуокиси природного урана.

Форма и конструкция тепловыделяющих элементов как из обогащенного урана, так и из естественного, приняты одинаковыми; однотипность облегчает задачу разработки тепловыделяющих элементов для водоводяного реактора.

Созданию принятой конструкции элементов предшествовали экспериментальные исследования, основные этапы которых ниже описаны.

I. ВЫБОР ТОПЛИВА

а) Металлический уран

Общеизвестно, что для реакторов, работающих на естественном или слабо-обогащенном уране, наиболее выгодным, с точки зрения физики реактора, было бы использование в качестве топлива металлического урана.

Однако ряд существенных недостатков, свойственных металлическому урану, затрудняет его использование в энергетических установках и особенно в водоводяных. Каковы эти недостатки ?

Прежде всего следует указать на то, что стоимость электро-

-3-

энергии, вырабатываемой на атомных электростанциях, находится в прямой зависимости от выгорания топлива. Следовательно, чем больше выработка энергии на единицу веса топлива, тем дешевле стоимость киловатт-часа вырабатываемой энергии. Тепловыделяющие элементы с большей живучестью позволяют реже производить замену топлива в реакторе, что значительно снижает затраты на изготовление элементов и химическую регенерацию топлива. Иными словами в энергетических системах топливо должно допускать достаточно большие выгорания за одну кампанию загрузки.

Между тем проведенными в различных странах /США, Англия, Франция, СССР и др./ многочисленными исследованиями показано, что при использовании металлического урана из-за изменений размеров и формы при облучении трудно достигнуть больших величин выгорания. Малое легирование урана, а также различные методы термо-механической обработки хотя и улучшают стойкость урана к радиационным повреждениям, но не настолько, чтобы надежно обеспечить необходимое выгорание в водяных энергетических реакторах.

Вторым не менее существенным недостатком металлического урана или его малолегированных сплавов является крайне низкая коррозионная стойкость в перегретой воде.

29-6282 При возможном нарушении герметичности защитной оболочки урановые сердечники тепловыделяющих элементов бурно взаимодействуют с водой, образуя продукты коррозии с заметно большим объемом, что приводит к значительным разрывам оболочки с очень сильным радиоактивным загрязнением первичного контура. Эти соображения /сейчас уже достаточно хорошо известные специалистам, работающим в области создания тепловыделяющих элементов/ привели пока к отказу от использования металлического урана для первых загрузок водоводяного реактора.

б) Окислы урана

Окислам урана, как топливу для энергетических установок, уделялось уже давно весьма большое внимание в ряде стран. Исследованиями, проведенными в СССР, в полном согласии с данными зарубежной периодической печати установлено, что наиболее приемлемым для использования в качестве топлива в энергетических реакторах является двуокись урана. Как указывалось в докладе академика И.В. Курчатова 25-го апреля 1956г. в Англии спеченная дву-

- 1 -

окись урана, вследствие устойчивости при облучении и нерастворимости в горячей воде является прекрасным материалом для уран-водной решетки. Длительные опыты на реакторе РФТ показали, что окисные тепловыделяющие элементы даже в условиях негерметичности их оболочки работают без загрязнения контура продуктами деления, небольшая газовая активность быстро исчезает после остановки реактора. Двуокись урана дешевле, чем металлический уран. Как недостаток двуокиси урана следует отметить ее сравнительно низкую теплопроводность, однако учитывая высокую температуру плавления /до 2800°C / этот недостаток при определенных условиях не может служить лимитирующим фактором.

Несмотря на то, что применение двуокиси урана вызывает заметное снижение коэффициента воспроизводства в уран-водной решетке, физические расчеты реактора заданных параметров показали, что использование двуокиси урана в качестве сердечников тепловыделяющих элементов вполне допустимо, при условии, что плотность ее будет не менее 9 г/см^3 .

II. ВЫБОР МАТЕРИАЛА ЗАЩИТНОЙ ОБОЛОЧКИ ТЕПЛОВЫДЕЛЯЮЩИХ ЭЛЕМЕНТОВ И КАССЕТЫ

Исходя из наиболее важных требований, предъявляемых к материалу оболочки тепловыделяющего элемента, а именно: малое поперечное сечение захвата нейтронов, достаточно высокие механические свойства при рабочих температурах и высокая коррозионная стойкость, наиболее надежным материалом был признан цирконий.

Учитывая трудности обеспечения в массовом производстве стабильности коррозионных и механических свойств чистого циркония необходимо было использовать сплавы циркония. Окончательному выбору циркониевого сплава для оболочек предшествовали исследования, часть из которых описана в другом докладе.^{х)} Для испытаний в энергетических петлях реактора РФТ были взяты циркониевые сплавы с танталом, ниобием и с оловом, никелем и железом.

^{х)} См. доклад "Механические свойства и коррозионная стойкость циркония и его сплавов в воде, паре и газах при повышенных температурах".

2829-62

-5-

В результате испытаний в петлях предпочтение было отдано сплаву с 1% ниобия, несмотря на то, что хорошие результаты были получены и с двумя другими сплавами. Это объясняется с одной стороны тем, что у сплава с 1% ниобия при повышенных температурах заметно более высокие механические свойства, чем у сплава с танталом /при 300°C условный предел текучести 12 кг/мм² у сплава с ниобием, вместо 7,5 кг/мм² у сплава с танталом/, в связи с чем его конструкционная надежность выше. С другой стороны производство сплава с ниобием технологически проще, чем многокомпонентного сплава - с оловом, железом и никелем.

Кассеты реактора работают при перепаде давления, составляющем ~1,5 атм., что при принятых размерах требует от материала кассеты более высоких механических свойств. Так, по данным расчета материал кассет должен обладать при температуре 280°C условным пределом текучести $\sigma_{0.2}$ не менее 19 кг/мм². Ни один из указанных выше сплавов не имеет такой прочности. В связи с этим для кассет был выбран сплав с 2,5% ниобия, обладающий хорошей коррозионной стойкостью при температуре 300°C и высокими механическими свойствами.

2129-62 В заключение этого раздела уместно отметить, что в качестве возможного заменителя циркония для оболочек, был испытан один из коррозионностойких при температуре 300°C сплавов на основе алюминия. Средний химический состав этого сплава следующий - 9% кремния, 1% никеля и остальное алюминий. Коррозионная стойкость сплава в деформированном состоянии, определенная как потеря механических свойств /предела прочности и удлинения/ после пребывания в течение 6500 часов в дистиллированной воде при температуре 300°C и давлении 87,6 кг/см² и выраженная в процентах к величине исходных свойств, составляет :

потеря предела прочности	-- 16%
потеря удлинения	-- 10%

При этом следует учесть, что потеря предела прочности, связана главным образом, с глубоким отжигом сплава в процессе испытания /6500 часов при 300°C/. О результатах испытания этого сплава в петле реактора РФТ будет сообщено ниже.

-8-

III. ВЫБОР РАЗМЕРОВ И ВАРИАНТОВ КОНСТРУКЦИИ ТЕПЛОВЫДЕЛЯЮЩЕГО ЭЛЕМЕНТА

а) Тепловыделяющий сердечник

При определении диаметра тепловыделяющего сердечника, а следовательно и диаметра самого тепловыделяющего элемента, наряду с требованиями, выдвигаемыми физикой реактора, существенное значение имели и такие ограничивающие факторы, как максимальная температура сердечника и допустимые тепловые нагрузки поверхности.

Была заранее определена необходимость создания достаточного температурного запаса, для того, чтобы гарантировать отсутствие плавления сердечника в процессе работы его. Наиболее целесообразной величиной диаметра сердечника, при условии обеспечения его плотности не менее $9,3 \text{ г/см}^3$, оказалось $8,8 \text{ мм}$, что и было выбрано.

б) Защитная оболочка

При выборе диаметра защитной оболочки учитывались соображения об обеспечении приемлемых тепловых условий, механической устойчивости и т.п.

I. Зазор между сердечником и оболочкой в холодном состоянии.

Если подходить к решению этого вопроса только с точки зрения обеспечения наилучшей теплопередачи, то наличие зазора следовало бы считать нежелательным.

Однако такой подход привел бы к серьезным недостаткам в конструкции тепловыделяющего элемента.

Зазор между тепловыделяющим сердечником из двуокиси урана и защитной оболочкой из циркониевого сплава прежде всего необходим для того, чтобы компенсировать разницу в термическом расширении их и не создавать значительных вредных напряжений в оболочке, понижающих ее живучесть, а иногда приводящих и к разрыву оболочки. В данном случае это особенно важно, так как коэффициент расширения циркониевого сплава составляет лишь $\sim 55\%$ от коэффициента расширения двуокиси урана, причем последняя имеет при работе значительно более высокую среднюю температуру. С другой стороны, чрезмерно большой зазор приведет к значительному ухудшению тепло-

29-6282

-7-

передачи и, как следствие, к недопустимому перегреву сердечника.

Следовательно, исходя из указанных двух положений, необходимо было ограничить величину зазора, как по минимуму, так и по максимуму.

Немаловажное значение при определении этого зазора имеет и технологический фактор, а именно вставка сердечников в трубчатые оболочки. Для нашего случая это обстоятельство имеет особое значение из-за большой длины тепловыделяющего элемента.

Конечно, вопрос о зазорах можно было бы несколько упростить за счет применения жидкого контактного слоя, однако выбор этого контактного слоя и технология его заливки — значительно более сложная задача, чем правильный выбор допустимых пределов зазора без заливки. Попутно отметим, что при выборе этих зазоров, мы имели в виду заполнение их гелием, что несомненно улучшало теплопередачу и облегчало контроль герметичности при максимальных зазорах.

В конечном счете, при комплексном учете всех факторов — разницы в расширениях, теплопередачи и технологии — оказалось возможным установить величину зазора на сторону в пределах 0,05–0,1 мм.

Таким образом внутренний диаметр защитной оболочки был выбран в пределах 8,9–9,0 мм.

2. Толщина стенки оболочки должна быть за все время работы тепловыделяющего элемента такой, чтобы гарантировать оболочку от потери устойчивости за счет внешнего давления 100 атм. при температуре 310°C.

Кроме того при выборе толщины оболочки следовало учитывать и необходимость максимально возможной экономии циркония, ввиду его высокой стоимости.

Соответствующими расчетами, уточненными специальными испытаниями на устойчивость было установлено, что толщина стенки в 0,6 мм. вполне надежно гарантирует длительную работоспособность защитной оболочки. Таким образом определился и наружный размер защитной оболочки равный 10,1–10,2 мм. На рис.4 приводится графическое изображение расчетных температур по сечению тепловыделяющего элемента при наиболее тяжелом режиме работы. При максимальном зазоре между сердечником и оболочкой, определяющемся допуска-

229-6282

-8-

ми на изготовление, температура на оси элемента не достигает температуры плавления двуокиси урана, если даже считать, что зазор занимает концентрическое расположение.

в) Длина тепловыделяющего элемента

Г. Короткие элементы. Первоначально казалось, что наиболее правильным было бы выбрать небольшую длину рабочей части элемента, например 200 мм, так как это обеспечивало достаточную прочность конструкции, легкость в дистанционировании и в технологии сборки сердечников. Однако детальная проработка этой конструкции выявила ряд существенных недостатков. Какие же недостатки имеет такая длина элементов?

Прежде всего необходимо отметить чрезвычайно большое количество сварных швов, герметизирующих оболочки. В самом деле при длине элемента 200 мм для обеспечения всей длины активной части реактора необходимо 13 элементов. Как минимум на каждом элементе необходимо иметь 2 сварки, следовательно в каждом элементе должно быть 26 сварок, в каждой кассете 2366 сварок, а для всего аппарата более 800.000 сварок. Если еще учесть то обстоятельство, что для обеспечения большой надежности по герметичности элементов, необходимо осуществлять двойную герметизацию каждого конца /об этом более подробно сообщается ниже/, то указанное число сварок необходимо еще удвоить.

Вторым недостатком коротких тепловыделяющих элементов является то, что подавляющее большинство всех сварных соединений находится в активной зоне. Таким образом по высоте реактора создаются много перерывов по активной длине, что вызывает появление "всплесков" нейтронного поля в этих зонах сопровождающихся повышением тепловой нагрузки на концах элементов.

Для того, чтобы в какой-то мере снизить вредный эффект этих "всплесков" необходимо сильно ограничить размеры сварных соединений по длине, что в свою очередь ухудшает конструкцию этого соединения и понижает надежность герметизации.

Наконец нельзя не отметить, что наличие большого числа узлов герметизации значительно увеличивает расход дорогого циркония на изготовление деталей узла герметизации и установочных решеток.

-9-

Все эти соображения заставили искать другие более совершенные решения в отношении длины тепловыделяющего элемента.

2. Другие варианты тепловыделяющего элемента. Наиболее радикальным средством устранения указанных выше недостатков 200 мм элементов было бы изготовление цельного элемента на всю длину активной зоны реактора. В этом случае резко сокращается число герметизируемых узлов /только 2 узла на каждый элемент вместо 26 узлов/; за счет выноса их за пределы активной зоны практически снимаются ограничения по конструкции и размерам сварных узлов, что повышает надежность герметизации, устраняются "всплески" нейтронного поля и, наконец, достигается большая экономия в расходе циркония.

Однако, наряду с большими преимуществами этого варианта, возникают новые трудности, связанные с одной стороны со сравнительно малой жесткостью такого длинного элемента и с другой стороны необходимостью дистанционирования элементов друг относительно друга. В сущности удачное решение задачи дистанционирования автоматически решало бы и проблему жесткости длинного элемента, в связи с чем прорабатывался ряд вариантов дистанционирования.

Из большого числа экспериментально проверенных вариантов дистанционирования остановимся на 3-х типичных вариантах.

а) Первый вариант : 5 элементов длиной по 500 мм собираются в один длинный элемент и по местам стыковки дистанционируются специальными звездочками.

Из рис.5 видно, как это осуществлялось. Для того, чтобы облегчить сборку и обеспечить правильное расположение звездочек друг относительно друга головки крайних элементов имели конфигурацию треугольных призм.

Этот вариант элемента, хотя и существенно лучше 200 мм, но в значительной степени еще сохраняет основные недостатки короткого элемента.

б) Второй вариант - дистанционирование элемента полной длины с помощью приваренных звездочек.

На рис.6 показано, как осуществлялся этот вариант. В местах приварки звездочек, внутри тепловыделяющего элемента вставлялась вместо сердечника из двуокиси урана циркониевая пробка высотой 6 мм.

29-6282

В этом варианте больше преимуществ, чем в первом, но и он не устраняет полностью недостатки короткого элемента. Следует также отметить и технологические трудности в выполнении этого варианта, связанные с необходимостью формирования перешейков с чередованием загрузки сердечников из двуокиси урана.

Кроме того в этом варианте /как и в первом/ таилась опасность соприкосновения элементов по активной части в случае повреждения какой-либо звездочки, что привело бы к преждевременному выходу элементов из строя.

Учитывая ажурность звездочек и способ их крепления, такая возможность не могла быть полностью исключена.

в) Третий вариант - дистанционирование с помощью специальных решеток, касающихся активной части тепловыделяющих элементов. Из многих типов таких решеток наибольший интерес представили двух- и четырехрусные решетки показанные на рис. 7 и 8.

На рис. 1 показано расположение дистанционирующих решеток в кассете с тепловыделяющими элементами. В двухрусной решетке касание по активной части элемента в одном сечении имеет место по двум линиям, а в четырехрусной только по одной линии, что является существенным преимуществом. Специальные определения гидравлического сопротивления каналов с указанными решетками дали положительные результаты. И в этом случае было установлено преимущество четырехрусной решетки - гидравлическое сопротивление решетки этого типа меньше, чем двухрусной.

Однако, возникал весьма важный и принципиальный вопрос о том, допустимо ли касание между дистанционирующей решеткой и активной частью тепловыделяющего элемента; не приведет ли это к перегоранию элемента или усилению коррозии в этих участках из-за ухудшения охлаждения? Не будет ли происходить, кроме того, истирание оболочки за счет вибрации при работе и вследствие этого ее чрезмерное утонение.

Экспериментальная проверка этих вопросов осуществлялась на пучках из 7 шт. модельных тепловыделяющих элементов в петлях реактора РФТ.

Испытания показали, что точечные касания или касания по линии, охватывающие ограниченные /но вполне достаточные для дистанционирования/ поверхности элемента вполне допустимы и практичес-

-11-

ки не отражаются на работоспособности и живучести тепловыделяющего элемента. Одновременно при этих испытаниях, длительность которых превышала 4000 часов, не было отмечено, каких-либо явлений механического износа соприкасающихся поверхностей или усиленной коррозии. Все эти результаты впоследствии были подтверждены на более крупной сборке тепловыделяющих элементов.

IV. ТЕХНОЛОГИЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ТЕПЛОВЫДЕЛЯЮЩИХ ЭЛЕМЕНТОВ

В этом разделе будут рассмотрены основные вопросы технологии, без описания деталей отдельных операций, т.к. они являются общепринятыми и хорошо известными.

Для изготовления сердечников из двуокиси урана были использованы методы порошковой металлургии; прорабатывались два метода:

1. Холодное прессование из порошка двуокиси урана таблеток на таблетировочных прессах с последующим спеканием при температурах 1700–1800° в вакууме или в инертной атмосфере. Однако, при этом методе, для обеспечения заданных геометрических размеров и плотности, ограничивалась высота таблеток, что вызывало в последующем значительные технологические затруднения особенно при набивке таблеток в трубки из циркониевого сплава.

2. Второй метод заключался в прессовании методом истечения длинных стержней из порошка двуокиси урана с органической связкой.

Далее эти стержни подвергались последовательной сушке при разных уровнях температур для постепенного удаления основной массы связки без повреждения стержней. Затем следовала операция спекания в вакууме или в инертной атмосфере при конечной температуре 1700–1800°C. Нужно отметить, что по этой технологии получают стержни высокого качества с плотностью не менее 9,5 г/см³ при номинальном диаметре после спекания 8,8 мм. Большое отношение длины к диаметру, при принятых зазорах между оболочкой и сердечником, позволяет легко осуществлять загрузку стержней в трубки из циркониевого сплава. Эта технология используется в производстве описанных тепловыделяющих элементов.

Был проработан ряд вариантов герметизации, которые подвергались сравнительной экспериментальной оценке. Один из наиболее

2829-62

простых вариантов представлял собой герметизацию торцов элемента роликовой контактной сваркой, как это схематически показано на рис.9. Испытания показали, что такой метод герметизации мало надежен и не может быть принят.

Для повышения надежности была применена аргоно-дуговая сварка в атмосфере аргона. На рис.10 схематически показан один из первоначальных вариантов такой герметизации. Качество такой герметизации оказалось несравненно лучше, чем при роликовой сварке, однако и оно не могло удовлетворить полностью. Еще лучшие результаты были получены при другой конструкции, показанной на рис.11. Однако в таком виде эту конструкцию нельзя было использовать, так как трудно было осуществить подвеску и крепление элементов в кассетах. Эта конструкция была видоизменена таким образом, что позволила осуществить совершенно надежную герметизацию и одновременно решить вопрос о креплении элементов в кассете.

На рис.12 показан этот окончательный вариант. Как видно из чертежа герметизация осуществляется двумя сварками: первая, основная, - аргоно-дуговая сварка и вторая, дополнительная, - роликовая сварка специального наконечника, выполняющего одновременно функции крепления элемента.

После отработки метода герметизации оболочки, окончательно определилась конструкция тепловыделяющего элемента, которая показана на рис.13.

Трубка из циркониевого сплава с одного конца осаживается на меньший диаметр, вставляется пробка из этого же сплава и заваривается аргоно-дуговой сваркой в атмосфере аргона. Затем производится загрузка спеченных сердечников из двуокиси урана на заданную высоту. Обжимается на меньший диаметр второй конец трубки /с оставлением компенсационного объема на разность термического удлинения сердечников и оболочки/, вставляется пробка, элемент заполняется гелием и конец заваривается. Далее одеваются наконечники и завариваются роликовой контактной сваркой.

В процессе изготовления и после окончания всех операций элемент подвергается различным видам контроля /определение герметичности, проверка правильности загрузки сердечников и т.п./, обеспечивающим соответствию элемента техническим условиям.

Кассета изготавливается из листового материала /циркониевый сплав с 2,5% ниобия/ путем гибки и сварки одним продольным швом. Особых затруднений при разработке технологии не встречалось. Сборка тепловыделяющих элементов в кассету осуществляется легко с обеспечением заданной точности.

У. ИСПЫТАНИЕ ТЕПЛОВЫДЕЛЯЮЩИХ ЭЛЕМЕНТОВ В ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ПЕТЛЯХ РЕАКТОРА РФТ^х)

Для определения работоспособности тепловыделяющих элементов, а также для выяснения ряда вопросов, о которых шла речь выше, в высокотемпературных петлях реактора РФТ проводились специальные испытания опытных сборок тепловыделяющих элементов. Этим экспериментам предшествовали многочисленные испытания коротких / $l = 200 \text{ мм}$ / тепловыделяющих элементов, позволившие получить достаточные данные по оценке коррозионной стойкости различных циркониевых сплавов в воде высокой температуры в поле облучения, по стойкости спеченной двуокиси урана, по качеству герметизации и т.п. вопросам.

Для последующих испытаний рабочая длина тепловыделяющего элемента была выбрана равной 1000 мм, что соответствует длине активной зоны реактора РФТ.

Элемент в средней части имел неактивный перешеек, к которому были приварены центрирующие звездочки, описанные выше в качестве одного из первых вариантов дистанционирования. Семь таких элементов собирались в сборки, показанные на рис. 14. Сборки загружались в каналы испытательных петель реактора РФТ.

Элементы скреплялись между собой с помощью двух решеток, в верхней части - круглой, а в нижней части - треугольной. В средней части они дистанционировались по треугольнику приваренными звездочками.

^х) Большую работу, обеспечивающую проведение испытаний тепловыделяющих элементов в петлях реактора РФТ в требуемых условиях, провели Августинovich В.И., Бабулевич Е.Н., Жигачев В.М., Козлов А.К., Николаев Ю.Г., Рязанцев Е.П., Фролов-Домнин И.П. и другие сотрудники РФТ.

2829-62

Испитания указанных сборок производились в каналах, представляющих собой трубку Фильда и помещаемых в одну из ячеек реактора РЭТ. Типовой образец канала с тепловыделяющими элементами показан на рис.15. Кожух канала имеет диаметр 60х4 мм. В кожухе помещается разграничительная труба диаметром 46,5х1 мм с байонетным затвором, в которую вставлена сборка из 7 тепловыделяющих элементов. Вода поступает сверху, через зазор между кожухом и разграничительной трубой и уходит вверх через сборку тепловыделяющих элементов.

Приведем результаты испытания двух сборок тепловыделяющих элементов метровой длины, которые по конструкции и технологии изготовления наиболее приближались к элементам, выбранным для энергетического водоводяного реактора.

В целях проверки работы элементов в возможно более жестких условиях первая сборка была помещена в канал экспериментальной петли реактора РЭТ, в которой могло поддерживаться давление до 200 атм. Это давало возможность довести температуру оболочки элементов до 350°C , не вызывая поверхностного кипения.

В сердечниках была использована двуокись урана обогащенного 235-м изотопом до 6%, в результате чего тепловая нагрузка поверхности элемента достигала $0,7 \cdot 10^6 \text{ ккал/м}^2 \text{ час}$. Температура воды на выходе из канала поддерживалась равной 300°C , а расход — $5 \text{ м}^3/\text{час}$, что соответствовало скорости воды $1,8 \text{ м/сек}$. При этих условиях максимальная расчетная температура поверхности оболочки была равна 350°C .

В этой петле сборка испытывалась 7464 часа.

В целях увеличения тепловой нагрузки поверхности в дальнейшем сборка была переставлена в канал другой петли, находящийся ближе к оси реактора. Здесь поддерживалось давление 100 атм., температура воды на выходе — 245°C и расход воды $5,6 \text{ м}^3$. При этом скорость воды составляла 2 м/сек , а максимальная тепловая нагрузка поверхности нагрева элементов достигала $0,95 \cdot 10^6 \text{ ккал/м}^2 \text{ час}$. Соответствующая этому режиму максимальная расчетная температура поверхности элементов сборки была равна 300°C . Длительность испытания в этой петле на 1-е февраля 1958г. составляла 3653 часа; испытания продолжаются. Таким образом общее время испытания этой сборки в двух петлях реактора РЭТ на 1-е февраля 1958г. составила

более 463 суток.

Подсчеты показывают, что за время испытания элементов сборки выгорание урана-235 составило ~20 кг/т исходной загрузки урана, что соответствует экспозиции, превышающей 15000 мгвдн/т. За все время испытаний каких-либо ненормальностей, указывающих на порчу элементов не отмечалось.

Через 3000 часов испытания эта сборка элементов была извлечена из петли и тщательно осмотрена, при чем состояние оболочек элементов было очень хорошее. На тепловыделяющих поверхностях оболочки было видно образование защитной пленки.

Здесь интересно отметить, что после загрузки сборки тепловыделяющих элементов в оболочки из циркониевого сплава в канал петли и выхода на заданную мощность, начинает повышаться гамма активность в контуре петли, которая достигает некоторого максимума, после чего спадает до фона.

Исследования этого явления показали, что источником гамма активности является цирконий. - 97. Очевидно это связано с тем, что в первое время испытания, при начальном формировании защитной пленки на цирконии, происходит частичный переход циркония в воду и вследствие этого повышение гамма активности. Это явление дало нам возможность следить за поведением оболочек циркониевого сплава в процессе испытания, так как оно сигнализировало появление в контуре циркония. Следовательно этим методом можно было устанавливать ненормальное повышение скорости коррозии циркониевых оболочек. Сквозное же разрушение оболочек четко контролировалось появлением газовой активности.

В связи с указанным интересен тот факт, что когда после 7464 часов работы в двухсотатмосферной петле, первая сборка элементов была перенесена в стоатмосферную петлю гамма активность в контуре в течение месяца три раза возрастала заметно выше фона. Каждый раз она за несколько часов достигала максимума /в 10 раз выше фона/ и затем спадала до фона. В дальнейшем гамма активность больше не повышалась. Эти явления, очевидно, были связаны с перестроением защитной пленки на цирконии, вследствие изменения условий испытания.

Наличие указанных выше двух методов контроля поведения тепловыделяющих элементов позволили нам свести к минимуму проме-

2829-62

жуточные осмотры испытуемых тепловыделяющих элементов. Нужно указать, что эти осмотры являются довольно неприятной операцией, так как при извлечениях из каналов сборок не исключается их повреждение; кроме того, в ряде случаев не представляется возможным произвести осмотр до полного окончания испытания.

Вторая сборка была составлена из тепловыделяющих элементов, у которых сердечники были изготовлены из двуокиси урана, обогащенного И-235 до 10%. В данном случае обогащение было повышено, чтобы увеличить тепловую нагрузку поверхности элементов и обеспечить возникновение поверхностного кипения. Согласно тепловым расчетам при отклонениях режима работы энергетического реактора от нормального на некоторых участках поверхности нагрева элементов может возникать локальное кипение, вследствие чего было существенным проверить стойкость оболочек тепловыделяющих элементов в этих условиях.

Сборка была помещена в канал стоатмосферной экспериментальной петли. Расход воды в канале поддерживался равным $5,5 \text{ м}^3/\text{час}$, что соответствовало скорости 2 м/сек , а температура воды на выходе из канала — 265°C . Максимальная тепловая нагрузка поверхности элементов достигала $1,15 \cdot 10^6 \text{ ккал/м}^2\text{час}$, а максимальная расчетная температура поверхности превышала температуру насыщения $/309^\circ\text{C}/$, что свидетельствовало о наличии поверхностного кипения.

Через 4960 часов испытания в контуре экспериментальной петли появилась газовая активность, в связи с чем испытание было прекращено и сборка была извлечена из канала для осмотра. Выгорание в элементах к моменту выгрузки составило по расчетам 13 кг/т или $\sim 10000 \text{ мг втдн/т}$.

При осмотре сборки прежде всего было обнаружено, что одна из центрирующих звездочек оторвалась. При тщательном осмотре было обнаружено, что на элементе, у которого отсутствовала звездочка, имеется небольшое по площади ($\sim 1 \text{ см}^2$) сквозное поражение циркониевой оболочки. Точно против этого повреждения на оболочке соседнего элемента было также обнаружено разрушение, но не сквозное. Поврежденные участки на обоих элементах покрыты белыми продуктами и весьма напоминают коррозионные поражения циркония. Следов оплавления или механического разрушения не было заметно. Вся оставшаяся поверхность оболочек элементов была в очень хорошем сос-

тоянии.

Внешний вид и характер расположения этих повреждений, указывают на то, что из-за нарушения дистанционирования произошло или соприкосновение или значительное сближение двух тепловыделяющих поверхностей, приведшее к перегреву этих поверхностей и к локальному резкому повышению скорости коррозии циркониевого сплава.

Это испытание наглядно показало ненадежность применившегося способа дистанционирования тепловыделяющих элементов, в связи с чем возникла задача создания более надежного дистанционирования элементов, исключающего возможность касания элементов между собой. Система дистанционирования была изменена /как это уже указывалось выше, см. стр. 16 / и вместо звездочек были применены специальные четырехярусные решетки; центрирование тепловыделяющих элементов в данном случае осуществляется циркониевыми полосками, касающимися поверхности элементов. Допустимость такого касания поверхности, работающей с большой тепловой нагрузкой, была проверена испытанием специальной сборки тепловыделяющих элементов, сечение которой показано на рис. 16. Конструкция элементов применялась практически такая же, что и в предыдущих опытах, с некоторыми изменениями, позволившими проверить допустимость касания в широком диапазоне тепловых нагрузок.

Опытная сборка была помещена в канал петли и успешно проработала в течение 1883 часов при тепловой нагрузке $1,1 \cdot 10^6$ ккал/м²час и 2464 при $2,1 \cdot 10^6$ ккал/м²час, после чего испытания были прекращены. Температура воды на выходе поддерживалась до 300°C, скорость воды 3-5 м/сек. После испытания сборка подвергалась тщательному внешнему осмотру, который показал хорошее состояние всех элементов. Участки, где происходило касание дистанционирующих решеток и тепловыделяющих поверхностей элементов, по внешнему виду практически не отличались от остальной поверхности. Это испытание, проведенное при тепловых режимах значительно более тяжелых, чем принятый режим работы энергетического реактора, подтвердило допустимость выбранного способа дистанционирования.

Для дальнейших испытаний тепловыделяющих элементов водородных энергетических реакторов была изготовлена сборка с натуральными размерами по длине. Несмотря на то, что по условиям работы реактора РЭТ только концы элементов длиной 1м. могли быть установ-

2829-62

лены в активной зоне, использование элементов полной длины представлялось целесообразным, чтобы обеспечить гидравлические и механические условия работы элементов /в частности, условия вибрации/, близкие к реальным.

Сборка /рис. I7/ представляет собой пакет, состоящий из 19 стержневых тепловыделяющих элементов $\varnothing 10,2$ мм, длиной 2500 мм, размещенных по треугольной решетке с шагом 14,3 мм. Размеры и конструкция элементов являются точной копией элементов принятых для водоводяного энергетического реактора.

Снизу элементы закрепляются в решетке при помощи шплинтования. Верхние концы элементов меньшего диаметра, свободно входят в решетку. Возможные удлинения стержней в период испытания компенсируются свободным перемещением их в верхней решетке.

Тепловыделяющие элементы центрируются между собой при помощи четырехъярусной решетки.

Чехлом пакета тепловыделяющих элементов служит шестигранная труба из циркониевого сплава с размером под ключ 68 мм, по длине которой на равных расстояниях установлены четыре центрирующих решетки. Длина чехла составляет 3000 мм, толщина стенки трубы 1,5 мм, стрела прогиба не превышает 1,5 мм на всей длине.

Для получения требуемых тепловых нагрузок в сердечниках элементов нижней части сборки, длиной 1000 мм, применена двуокись урана 10% обогащения, наполнение остальной части элементов, длиной 1500 мм, производилось двуокисью естественного урана.

Пакет из 19 стержней вместе с шестигранным чехлом, служащим разграничительной трубой, помещен в стальной канал $\varnothing 89$ мм, который был присоединен к контуру водяной экспериментальной статомосферной петли.

Перед началом испытаний были проведены физические опыты по измерению степени взаимного экранирования элементов в пакете. Естественно, что в сборке, состоящей из 19 стержней, возникает некоторая неравномерность распределения плотности поля тепловых нейтронов по сечению. Ход нейтронного поля по высоте активной зоны аппарата РЭТ в месте расположения канала /отражатель реактора/ также сильно влияет на условия работы тепловыделяющих элементов. Между тем для точного расчета теплового режима испытания элементов необходимо знание распределения плотности тепловых нейтронов

по об'ему пакета.

Изучение формы поля тепловых нейтронов в канале с элементами проводилось при помощи активации метровых медных проволок, расположенных в различных местах по сечению пакета. Проволока $\varnothing 0,65\text{мм}$, из чистой меди, герметизировалась в медные трубочки размером $2,5 \times 0,75\text{мм}$ длиной 1100 мм во избежание возможного загрязнения в канале с водой. Таким способом было изготовлено и расставлено в промежутках между элементами 10 эталонов. Канал заливался водой, и облучение образцов проводилось при мощности аппарата РФТ порядка нескольких десятков ватт. Извлечение проволоки освобождалось от защитных оболочек и их активация по длине замерялась через каждые 10 мм на специальной установке.

Результаты эксперимента свелись к определению коэффициентов неравномерности плотности тепловых нейтронов в канале с элементами; отношение максимальной плотности к средней по высоте активной зоны оказалось равным $1,25$ и по сечению $1,14$.

В настоящее время испытания сборки с 19-ю тепловыделяющими элементами в аппарате РФТ продолжаются.

В заключение приводим данные по испытаниям тепловыделяющих элементов с оболочками из алюминиевого сплава, о которых указывалось выше /см. стр. 8/.

Испытания проводились в стоатмосферной петле реактора РФТ. Во время испытания температура воды на выходе из канала поддерживалась равной 220°C , максимальная тепловая нагрузка поверхности элементов составляла $0,7 \cdot 10^6 \text{ ккал/м}^2 \text{ час}$. При этом расчетная температура поверхности элементов достигала 275°C .

Сборка испытывалась в канале петли в течение 6337 часов без каких-либо повреждений. За это время выгорание в элементах по подсчетам достигало 11 кг/т /8500 мгвгдн/т/.

После окончания экспериментов поверхность элементов оказалась во вполне удовлетворительном состоянии; она практически не изменилась за исключением того, что оказалось покрытой тонкой сравнительно плотной пленкой белого цвета. Под пленкой, счищавшейся стальным предметом, поверхность была чистой. Внутренняя разделительная труба в канале, изготовленная из того же алюминиевого сплава и находившаяся в воде при температуре 220°C также была в хорошем состоянии — она лишь несколько потемнела.

2829-62

Резюмируя результаты описанных в настоящем сообщении испытаний, а также и других, не вошедших сюда, можно указать, что принятая конструкция и технология изготовления тепловыделяющих элементов для водоводяного энергетического реактора вполне себя оправдала.

Наряду с проверкой надежности работы самих тепловыделяющих элементов попутно были выяснены и ряд дополнительных вопросов, связанных с поведением элементов в реакторе: допустимость электрохимического контакта циркониевых сплавов с нержавеющей сталью IX18N9T; малая чувствительность циркониевых сплавов к целевой коррозии при применяемом составе воды и другие



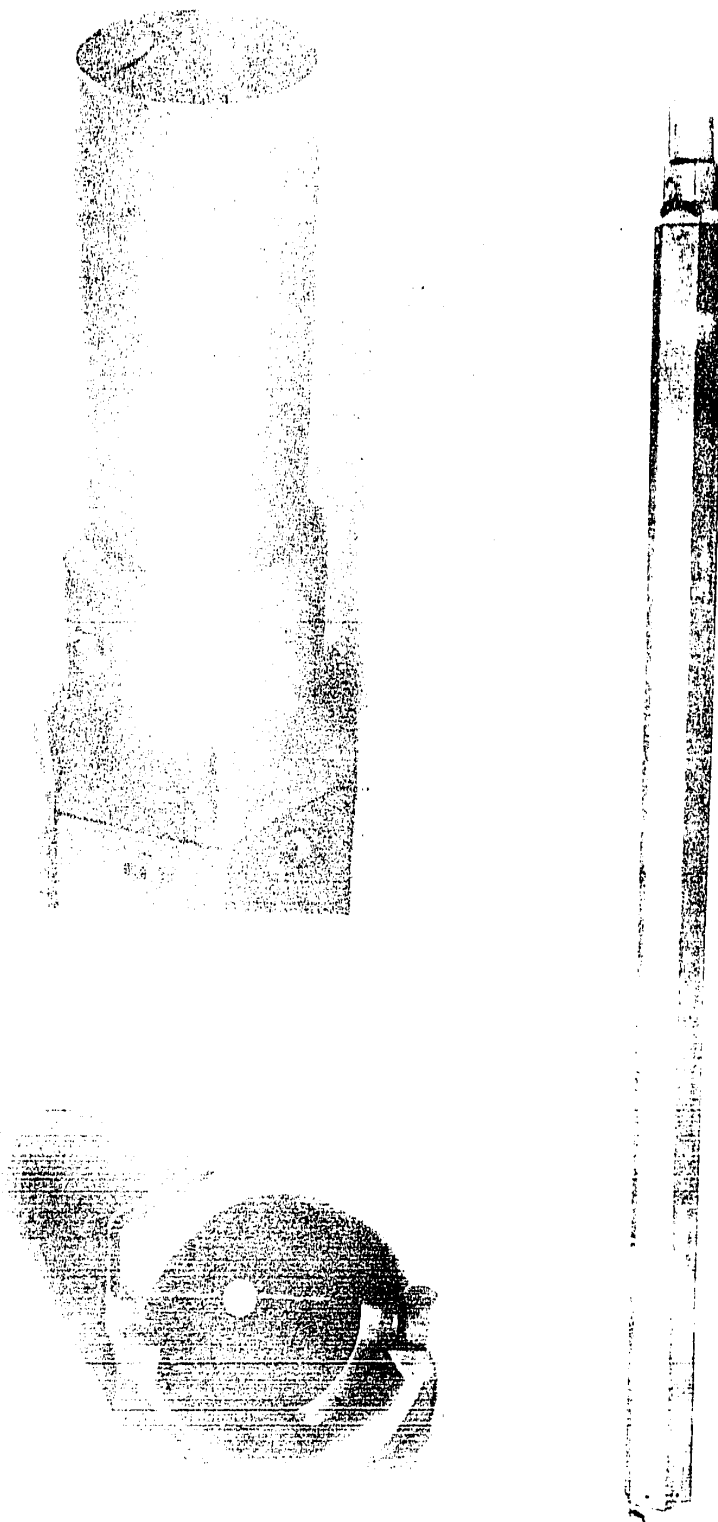


Рис.2. Общий вид кассеты

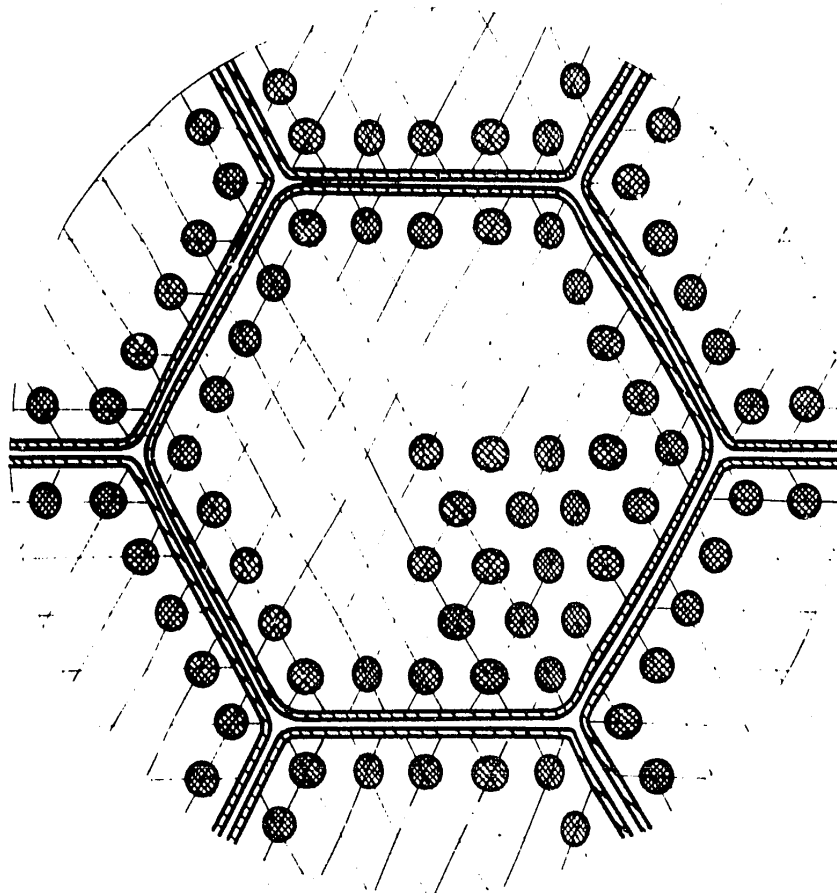


Рис.3. Размещение кассет в активной зоне

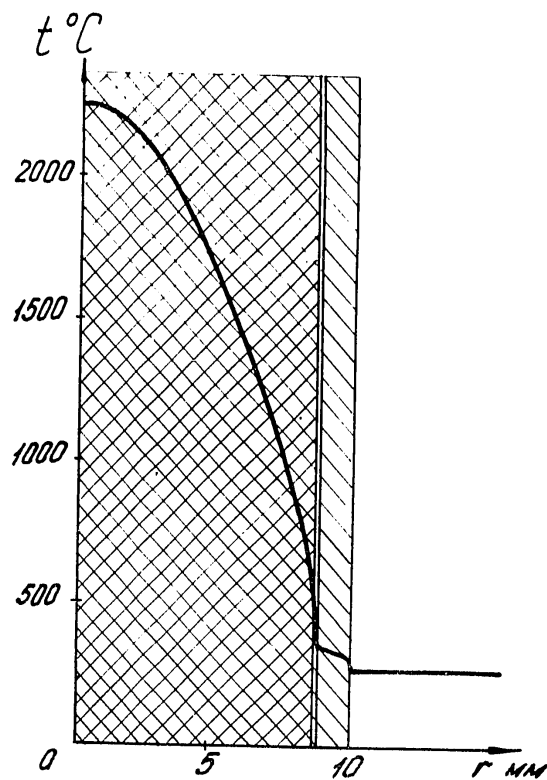
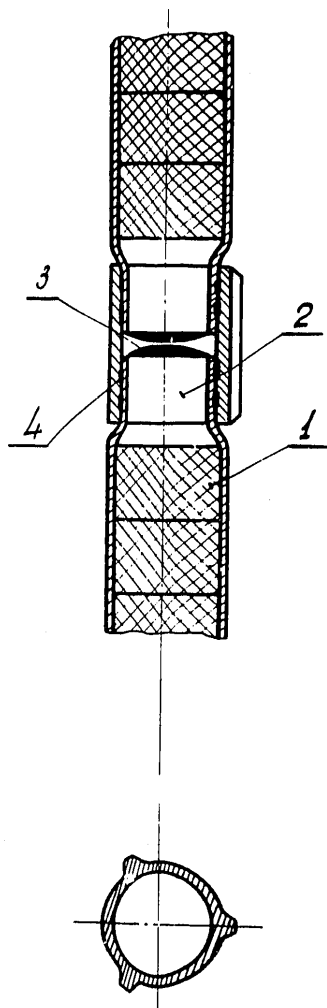


Рис.4. Изменение температуры по радиусу тепло-
выделяющего элемента /тепловая нагрузка
 $1,2 \cdot 10^6$ ккал/м²час/.

-25-



2809-62

Рис.5.Соединение отдельных коротких элементов.

- 1 - Таблетки из двуокиси урана
- 2 - Пробка из циркония
- 3 - Аргонодуговая сварка
- 4 - Роликовая сварка

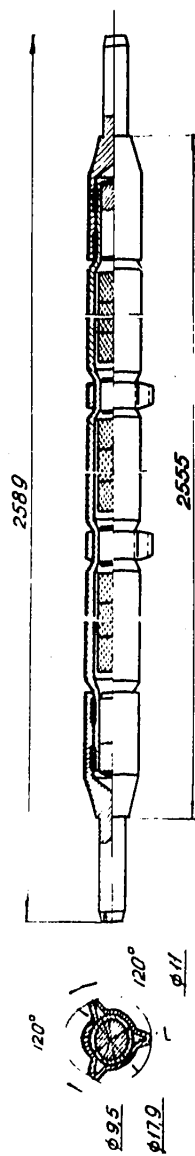


Рис.6. Тепловыделяющий элемент с дистанционирующими звездочками

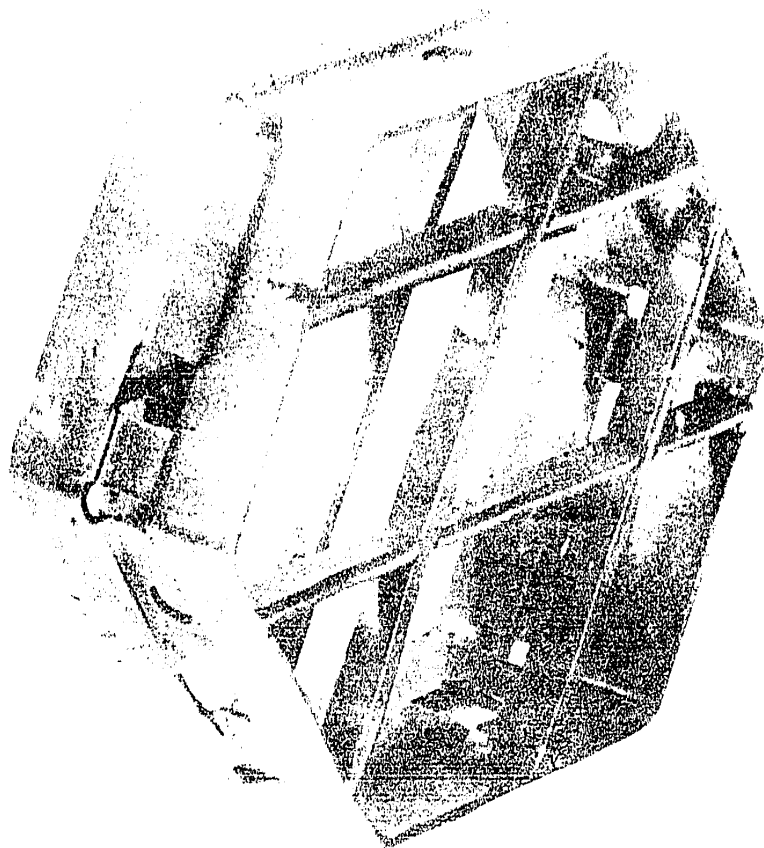


Рис.7. Двухъярусная дистанционирующая решетка для
опытной кассеты с 19-ю тепловыделяющими
элементами.

-28-

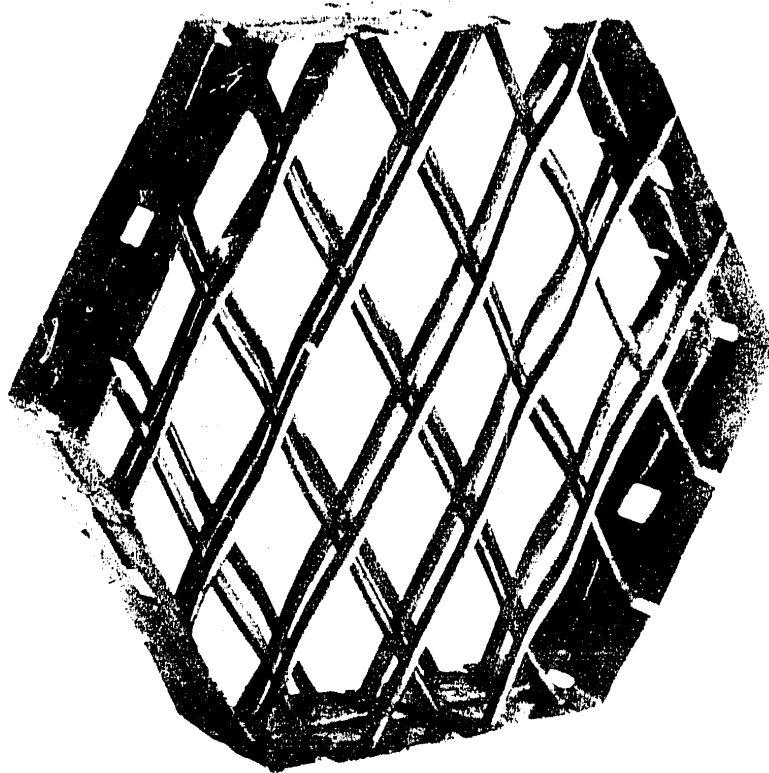


Рис.8.Четырехъярусная дистанционирующая решетка
рабочей кассеты.

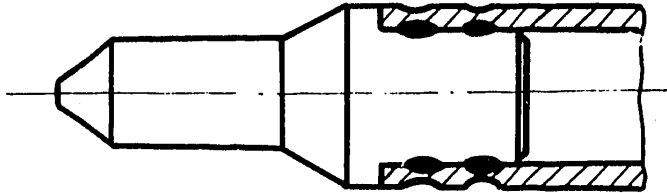


Рис.9. Вариант герметизации торца роликовой контактной сваркой.

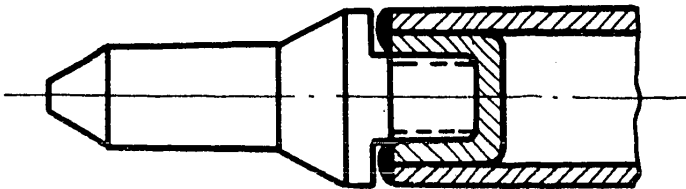


Рис.10. Вариант герметизации аргоно-дуговой сваркой.

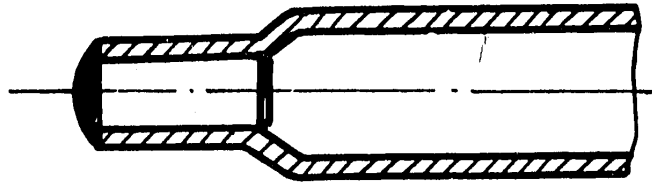


Рис.11. Второй вариант герметизации торца
аргоно-дуговой сваркой.

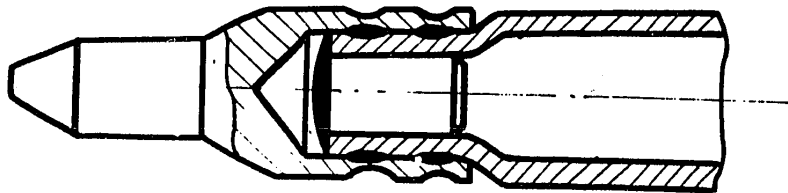


Рис.12. Окончательный вариант двойной гермети-
зации торца.

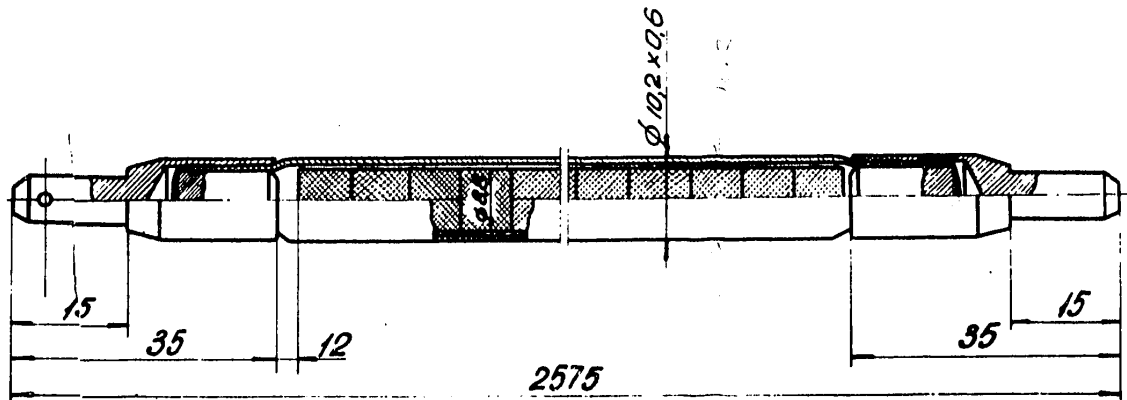


Рис.13. Окончательная конструкция тепловыделяющего элемента



Рис. 11. Опытные сборки из 7-мм тепловых элементов I м.

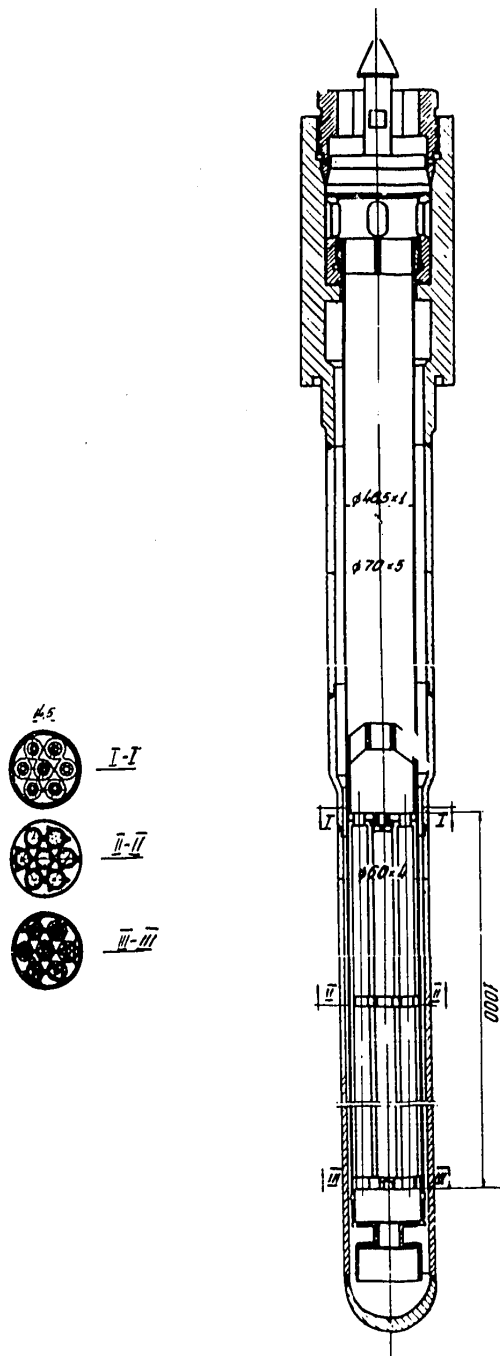


Рис. 15. Канал детали для испытания тепловыделяющих элементов.

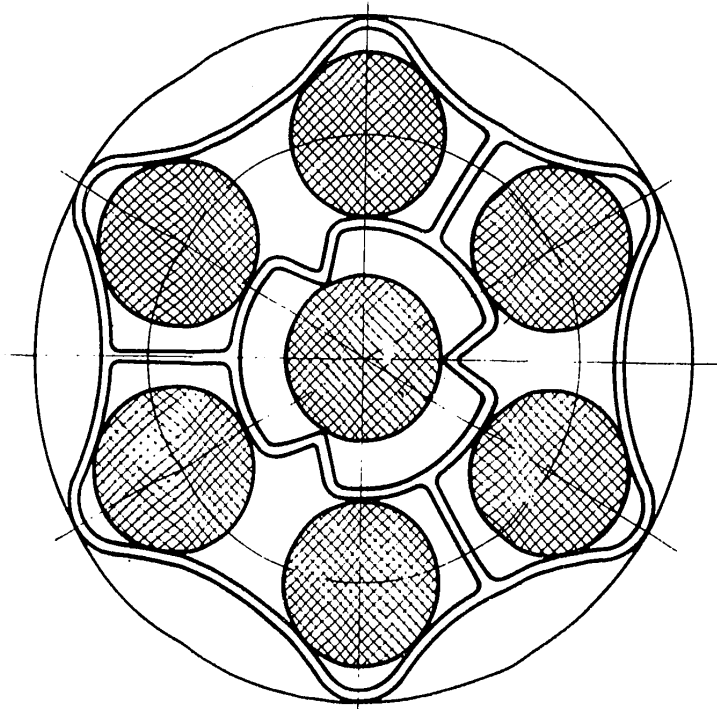


Рис. 16. Экспериментальная сборка элементов с
электронизирующей решеткой.

2829-62

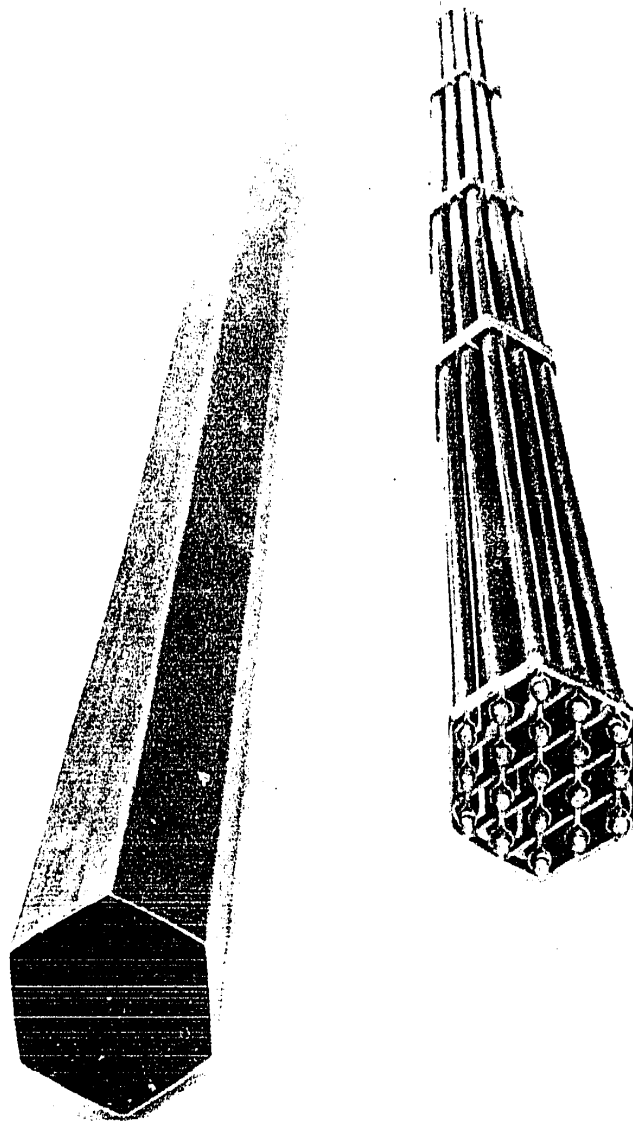


Рис. 17. Экспериментальная кассета с 10-ю тепловыделяющими элементами